

---

**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
PREHRAMBENO-TEHNOLOŠKI FAKULTET OSIJEK**

**Daria Jovičić**

**UTJECAJ PROCESNIH PARAMETARA I SASTOJAKA NA  
REOLOŠKA SVOJSTVA EMULZIJE ULJA I VODE**

**SPECIJALISTIČKI RAD**

**Osijek, srpanj, 2016.**

---

## TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

## SPECIJALISTIČKI RAD

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku  
Prehrambeno-tehnološki fakultet Osijek  
Poslijediplomski specijalistički studij Sigurnost i kvaliteta hrane

Zavod za prehrambene tehnologije  
Katedra za prehrambeno inženjerstvo  
Franje Kuhača 20, 31000 Osijek, Hrvatska

**Znanstveno područje:** Biotehničke znanosti  
**Znanstveno polje:** Prehrambena tehnologija  
**Nastavni predmet:** Dostignuća u tehnologiji namirnica biljnog podrijetla s elementima HACCP-a II  
**Tema rada** je prihvaćena na VII. redovitoj sjednici Fakultetskog vijeća Prehrambeno-tehnološkog fakulteta Osijek u akademskoj godini 2010./2011. održanoj 27. travnja 2016.  
**Mentor:** *Izv.prof.dr.sc. Tihomir Moslavac*  
**Pomoć pri izradi:** *Daniela Paulik, tehničar*

### UTJECAJ PROCESNIH PARAMETARA I SASTOJAKA NA REOLOŠKA SVOJSTVA EMULZIJE ULJA I VODE

*Daria Jovičić, 28/S-07*

#### Sažetak:

Kvaliteta, trajnost, okus i izgled prehrambenih proizvoda u vrlo velikoj mjeri ovisi o sastavu i načinu na koji sastojci utječu jedan na drugi pri stvaranju tog proizvoda. Emulzijama se u teorijskom smislu smatraju dvije tekućine koje se prirodno ne miješaju. U prehrambenoj industriji najvažniji tip emulzija su emulzije ulje u vodi, najraznovrsnije su i najraširenije (majoneza, kremasti likeri, sladoled, vrhnje za šlag i sl.); njihova svojstva kontrolirana su korištenjem stabilizatora i komponentama prisutnim u vodenoj fazi. Poznavanje reoloških svojstva emulzija vrlo je bitno za homogenizaciju, vremenski rok, senzorska svojstva i kao parametar za kreiranje novog proizvoda. Cilj rada bio je prikazati kako procesni parametri (brzina homogenizacije, vrijeme homogenizacije), utječu na reološka svojstva emulzije ulje-voda i kako različiti sastojci (ugljikohidrati, mliječni sastojci, žumanjak) također utječu na viskoznost, konzistenciju i indeks tečenja. Dobiveni rezultati pokazuju da brzina homogenizacije zajedno sa vremenom homogenizacije utječe na reološka svojstva emulzije ulje/voda povećavajući viskoznost i konzistenciju i sukladno tome smanjuje se indeks tečenja. Od ispitivanih sastojaka dodatak inulina HD kod ugljikohidrata pokazao je najveći viskoznost i konzistenciju, kod ispitivanja utjecaja mliječne komponente obrano mlijeko u prahu, a kod utjecaja žumanjka kokošjeg jajeta pasterizirani svježi žumanjak.

**Ključne riječi:** reologija, emulzije, procesni parametri, sastojci, viskoznost

**Rad sadrži:** 50 stranica  
14 slika  
8 tablica  
0 priloga  
27 literaturnih referenci

**Jezik izvornika:** Hrvatski

---

**Sastav Povjerenstva za obranu:**

- |   |               |
|---|---------------|
| 1. dr. sc. <i>Drago Šubarić</i> , red. prof.    | predsjednik   |
| 2. dr. sc. <i>Tihomir Moslavac</i> , izv. prof. | član-mentor   |
| 3. dr. sc. <i>Stela Jokić</i> , izv. prof.      | član          |
| 4. dr. sc. <i>Jurislav Babić</i> , izv. prof.   | zamjena člana |

**Datum obrane:** 29. rujan 2016.

**Rad je u tiskanom i elektroničkom (pdf format) obliku pohranjen u** Knjižnici Prehrambeno-tehnološkog fakulteta Osijek, Franje Kuhača 20, Osijek.

**BASIC DOCUMENTATION CARD**

POSTGRADUATE SPECIALIST THESIS

**University Josip Juraj Strossmayer in Osijek**  
**Faculty of Food Technology Osijek**  
**Postgraduate Specialist Study- Food safety and quality**  
**Department of Food Technologies**  
**Subdepartment of Food Engineering**  
Franje Kuhača 20, HR-31000 Osijek, Croatia

**Scientific area:** Biotechnical sciences  
**Scientific field:** Food technology  
**Course title:** Achievements in Technology of Plant source Groceries with Elements of HACCP II  
**Thesis subject** was approved by the Faculty Council of the Faculty of Food Technology at its session no. VII held on April 27, 2011.  
**Mentor:** *Tihomir Moslavac, PhD, associate prof.*  
**Technical assistance:** *Daniela Paulik, technician*

**IMPACT OF PROCESS PARAMETERS AND INGREDIENTS ON REOLOGICAL PARAMETERS OF OIL –WATER EMULSIONS**

*Daria Jovičić, 28/S-07*

**Summary:** Quality, durability, flavor and appearance of food products in a very large extent depends on the composition and the manner in which components affect each other in the creation of that product. Emulsions are theoretically considered two liquids that naturally do not mix. In the food industry the most important type of emulsions are emulsions of oil in water, they are most diverse and most widespread (mayonnaise, cream liqueurs, ice cream, whipped cream, etc.); their properties are controlled using the stabilizers present in the aqueous phase. Knowing the rheological properties of emulsions is very important for homogenization, shelf time, and sensory properties and as a parameter for designing a new product. The aim was to show how the process parameters (homogenization speed, homogenization time), affect the rheological properties of the oil-water emulsion and how different ingredients (carbohydrates, dairy ingredients, egg yolk) also affect the viscosity, consistency and flow behavior index. The results show that the speed of homogenization with homogenization time affects the rheological properties of oil / water emulsions by increasing the viscosity and consistency, and accordingly decreases the flow behavior index. Of the tested ingredients addition of inulin HD as carbohydrate showed the highest viscosity and consistency, in examining the impact of dairy components skimmed milk powder, and as impact of a chicken egg yolk pasteurized fresh egg yolk.

Key words: rheology, emulsions, process parameters, ingredients, viscosity

**Thesis contains:** 50 pages

---

14 figures  
8 tables  
0 additions  
27 references

**Original in:** Croatian

**Defense committee:**

- |   |              |
|---|--------------|
| 1. <i>Drago Šubarić</i> , PhD, prof               | chair person |
| 2. <i>Tihomir Moslavac</i> , PhD, associate prof. | supervisor   |
| 3. <i>Stela Jokić</i> , PhD, associate prof.      | member       |
| 4. <i>Jurislav Babić</i> , PhD, associate prof.   | stand-in     |

**Defense date:** Seotember 29. 2016.

**Printed and electronic (pdf format) version of thesis is deposited in** Library of the Faculty of Food Technology Osijek, Franje Kuhača 20, Osijek.

---

Zahvaljujem se dr.sc. Tihomiru Moslavcu, red. prof. na stručnoj pomoći u odabiru teme rada i pri izradi ovog rada. Također se zahvaljujem Danieli Paulik, tehničarki, u laboratorijskoj izradi rada.

---

## Sadržaj

1	UVOD .....	1
2	TEORIJSKI DIO .....	5
2.1	REOLOGIJA .....	6
2.1.1	Kruti materijali .....	7
2.1.2	Tekući materijali.....	9
2.1.2.1	Viskozitet.....	9
2.1.2.2	Newtonovske tekućine .....	10
2.1.2.3	Ne-Newtonovske tekućine.....	11
2.1.2.4	Vremenski ovisni fluidi .....	12
2.1.2.5	Vremenski neovisni fluidi .....	12
2.1.3	Instrumenti za mjerenje reoloških parametara – viskozimetri /reometri .....	14
2.2	EMULZIJE.....	15
2.2.1	Stabilnost emulzija .....	16
2.2.1.1	Fizikalni procesi destabilizacije emulzija.....	17
2.2.1.1.1	Vrhnjenje.....	17
2.2.1.1.2	Flokulacija.....	18
2.2.1.1.3	Koalascencija .....	18
2.2.1.1.4	Ostwaldovo zrenje.....	19
2.2.1.1.5	Inverzija faza.....	20
2.2.2	Stvaranje emulzija .....	21
2.2.3	Dodaci emulzijama.....	23
3	EKSPERIMENTALNI DIO .....	25
3.1	ZADATAK.....	26
3.2	MATERIJALI I METODE .....	26
3.2.1	Materijali .....	26
3.2.2	Metode.....	27
3.2.2.1	Priprema emulzije ulje/voda.....	27
3.2.2.2	Mjerenje reoloških svojstava.....	31
3.2.2.3	Izračun reoloških parametara .....	32
4	REZULTATI.....	35
5	RASPRAVA.....	41
5.1	UTJECAJ SASTOJAKA NA REOLOŠKA SVOJSTVA EMULZIJE ULJE/VODA.....	42

---

5.2	UTJECAJ PROCESNIH PARAMETARA NA REOLOŠKA SVOJSTVA EMULZIJE ULJE/VODA.....	44
6	ZAKLJUČCI.....	46
7	LITERATURA.....	48

## **1 UVOD**



---

Kvaliteta, trajnost, okus i izgled prehrambenih proizvoda u vrlo velikoj mjeri ovisi o sastavu i načinu na koji sastojci utječu jedan na drugi pri stvaranju tog proizvoda. Pri nastajanju i stvaranju proizvoda proizvođač mora voditi računa o procesima koji utječu na to stvaranje; fizikalni (razdvajanje faza, sile između čestica); kemijski (stvaranje veza između molekula i čestica); bioloških (fermentacija, djelovanje enzima) (Friberg i sur., 2004).

U modernoj prehrambenoj industriji niz proizvoda koji su u širokoj upotrebi klasificiraju se kao emulzije. Mnogi proizvodi koje danas koristimo u svakodnevnoj prehrani su emulzije, npr. margarin, sladoled, vrhnje za kuhanje, majoneza i sl. Razumijevanje stvaranja, strukture i svojstava emulzija nužno je kako bi se stvorila stabilna struktura gotovog željenog proizvoda. Vrlo često stvaranje emulzija i njihov sastav nailazi na niz koraka koje mora zadovoljiti proizvođač, od okusa, prihvatljivosti, ekonomske isplativosti, mikrobiološke ispravnosti i zbog tog je poznavanje osnovnih principa i tehnika nastajanja emulzija neophodno u kreiranju gotovog proizvoda. Emulzijama se u teorijskom smislu smatraju dvije tekućine koje se prirodno ne miješaju. U prehrambenoj industriji najvažniji tip emulzija su emulzije ulje u vodi, najraznovrsnije su i najraširenije (majoneza, kremasti likeri, sladoled, vrhnje za šlag i sl.); njihova svojstva kontrolirana su korištenjem stabilizatora i komponentama prisutnim u vodenoj fazi. Drugi tip su emulzije voda u ulju (maslac, margarin i namazi na bazi masnoća); njihova stabilnost ovisi o svojstvima masnoće i stabilizatoru. Treći tip emulzija su voda–ulje–voda; najkompleksnije su i najteže se stabiliziraju.

Ulje voda emulzije najčešće su karakterizirane kroz tri tipa završnog proizvoda. Prvi tip je sam završni proizvod (likeri, vrhnje za kavu i sl) i bitno je kod ovih emulzija da ne dođe do procesa destabilizacije vrhnjenjem i koalescencijom tijekom vremena trajanja proizvoda. Drugi tip su emulzije koje su primarni sastojci u pripremi završnog proizvoda kao npr. jogurt, prerađeni sirevi i drugi gelirajući sustavi i njihova uloga je pojačati reološka svojstva gela u smislu teksture i okusa. Treća skupina su emulzije čije kapljice tijekom prerade stvaraju potpuno novi proizvod npr. sladoled, tučeni proizvodi gdje se emulzija destabilizira i koristi kao sredstvo za stvaranje strukture željenog proizvoda (Friberg i sur., 2004).

Reologija je multidisciplinarna znanost koja proučava deformaciju i tečenje tvari. Kao takva ima puno veze s fundamentalnom fizikom i kemijom, kao i mnoge aplikacije u tehnologiji i inženjerstvu materijala i mnogim područjima bioloških znanosti. U okviru mehanike krutih tijela,

---

efekti kao što su dugoročno ponašanje, mehanička svojstva materijala kao i njihove tehnološke osobine su osnovni predmeti reoloških analize (Malkin, Isayev, 2012).

Poznavanje reoloških svojstva emulzija vrlo je bitno iz više razloga. Učinkovitost razdvajanja čestica u homogenizatoru ovisi o viskozitetu individualnih komponenti kao i o ukupnoj reologiji proizvoda. Vijek trajanja emulzije ovisi o reološkim karakteristikama faza komponenti kao npr. vrhnjenje tj. udruživanje kapljica ulja u emulzijama ulje voda je vrlo ovisno o viskozitetu vodene faze. Poznavanje reologije prehrambenih emulzija pomaže prehrambenim inženjerima u dizajniranju procesnih operacija koje ovise o tome kako proizvod teče npr. kroz cijevi, miješanje u mikseru prolazi kroz izmjenjivač topline i sl. Mnoga senzorska svojstva povezana su sa reološkim svojstvima kao što su gustoća, glatkoća, mazivost, kremasta konzistencija, čvrstoća itd. Osim toga reološka mjerenja često koriste prehrambeni znanstvenici kao analitički alat koji im pruža osnovni uvid u strukturalnu organizaciju i interakcije komponenti unutar emulzije (npr. odnos viskoznosti i smicanja može se koristiti za dobivanje informacije o jakosti koloidnih interakcija između kapljica. Unatoč različitosti reološkog ponašanja emulzija često je moguće karakterizirati njihovu reologiju u smislu nekoliko jednostavnih modela, idealno krute, idealno tekuće i idealno plastične. Složeniji sustavi se dalje mogu opisati kombinacijom ovih jednostavnih modela (Mc Clements, 2016).

Cilj ovog rada je prikazati kako procesni parametri (brzina rotacije rotora homogenizatora, vrijeme homogenizacije) i dodaci različitih prehrambenih komponenti, emulziji ulje-voda utječu na reološka svojstva te emulzije.

---

## **2 TEORIJSKI DIO**

---

## 2.1 REOLOGIJA

Naziv Reologija dao je profesor Bingham sa Lafayette fakulteta i označava znanstvenu granu koja proučava tečenje i deformaciju tvari, a posebno njihovo ponašanje na prijelazu između faza tekuće-kruto. Dodatno, reologija pokušava definirati odnos između djelovanja tangencijalne i normalne sile na dati materijal i deformaciju i/ili tečenje koji nastaje kao rezultat djelovanje te sile. Reološka svojstva su određena mjerenjem sile i deformacije kao funkcije vremena (G.T. Munizaga i sur., 2005.).

O reologiji se može govoriti kao o materijalnoj znanosti hrane i postoji niz područja u prehrambenoj industriji gdje su potrebni reološki podaci:

- a) Kalkulacije u procesnom inženjerstvu koje uključuju široko područje opreme kao što su cjevovodi, pumpe, ekstruderi, mješači, izmjenjivači topline, homogenizatori i procesni viskozimetri
- b) Određivanje funkcionalnosti sastojaka u razvoju proizvoda
- c) Kontrola kvalitete poluproizvoda ili gotovog proizvoda
- d) Testiranje vijeka trajanja
- e) Evaluacija teksture hrane korelaciji sa senzorskim podacima
- f) Analiza reoloških jednadžbi stanja ili konstitutivne jednadžbe (Steffe, 1996.)

S obzirom da reologija proučava deformaciju tvari, neophodno je razumjeti djelovanje naprezanja i deformacije. Naprezanje je definirano kao djelovanje sile na jedinicu površine (jedinica Pascal;  $\text{N/m}^2$ ).

Jednadžbe koje pokazuju odnos između naprezanja i deformacije nazivaju se ili reološke jednadžbe stanja ili konstitutivne jednadžbe. U kompleksnim sustavima te jednadžbe mogu uključivati ostale varijable kao što su vrijeme, temperatura, pritisak.

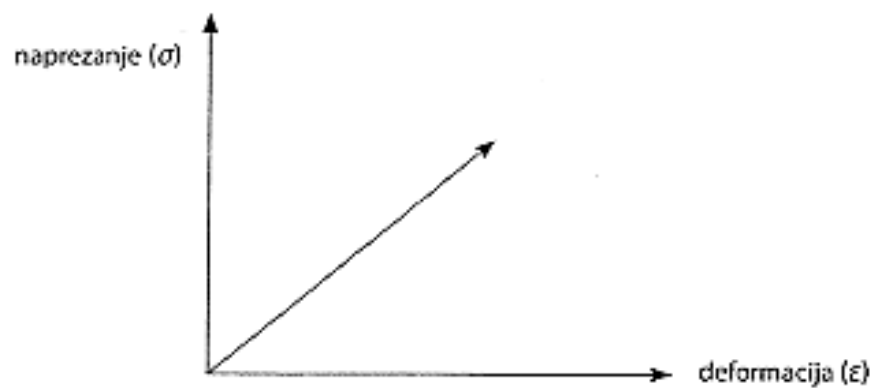
Namirnice se mogu klasificirati različito kao npr. krute, gelovi, homogene tekućine, suspenzije i emulzije (Rao, 2014.).

---

### 2.1.1 Kruti materijali

Kada se sila primjeni na kruti materijal i nastala krivulja /naprezanje/deformacija) je linearna kroz svoje ishodište, materijal je pod utjecajem Hookovog zakona (deformacija tijela proporcionalna primijenjenoj sili pod uvjetom da se ne prijeđe granica elastičnosti tijela). Linearni odnos između naprezanja ( $\sigma$ ) i deformacije ( $\epsilon$ ) koristi se za određivanje Youngovog modula elastičnosti (E)

$$\sigma = E \epsilon \quad [2.1]$$

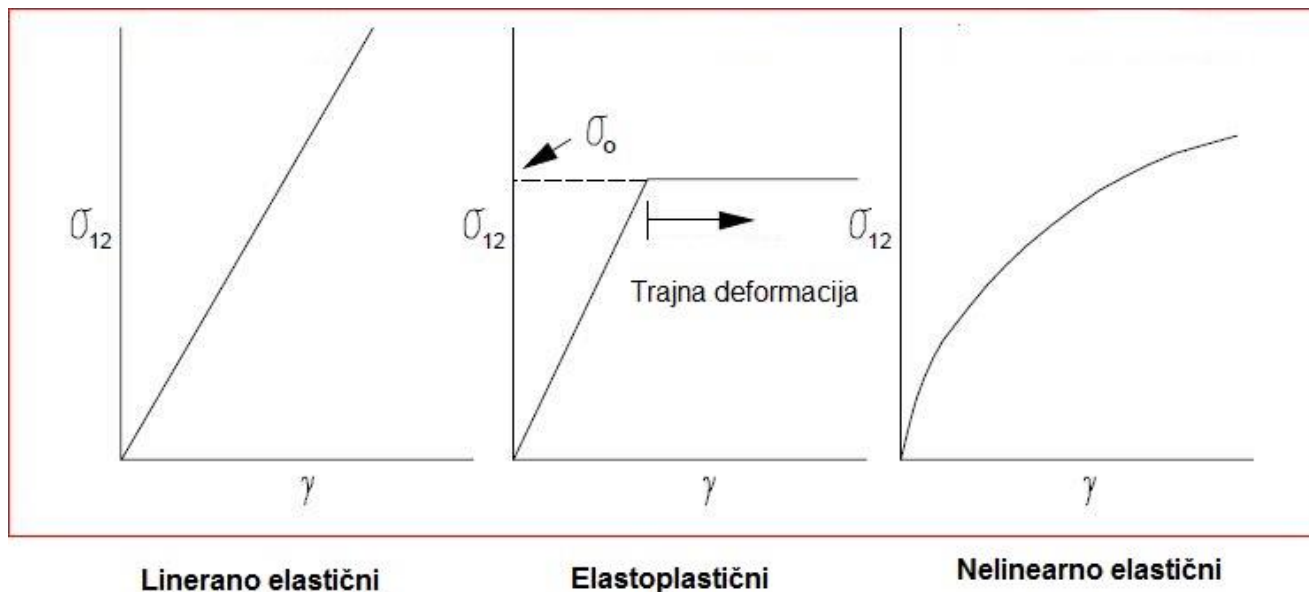


Slika 1. Prikaz elastičnog ponašanja materijala

Hookovi materijali ne teku i linearno su elastični i ponašanje im ne ovisi o vremenu tj. deformacija je trenutačna. Mnoge krute tvari podliježu ovom zakonu (suha tjestenina, tvrdi bomboni, ljuska jajeta, čelik, ali pod uvjetom da je naprezanje malo obično ispod 0,01).

Linearno elastični i nelinearno elastični materijali (guma) vraćaju se u svoje početno stanje kada se naprezanje ukloni. Hrana je po prirodi kruta ali nije Hookov materijal.

Usporedba krivulje za linearno elastične ((Hook), elastoplastične i nelinearne materijale pokazuje brojne sličnosti i različitosti (slika 2.).



Slika 2. Deformacijska krivulja za linearno elastične (Hook), elastoplastične i nelinearne elastične materijale (Steffe, 1996.).

Elastoplastični materijali pokazuju Hookov tip ponašanja ispod naprežanja ( $\sigma_o$ ), ali teku kod vrijednosti iznad (npr. margarin, maslac na sobnoj temperaturi)

Pogrešno ponašanje krutih materijala (posebno lomljivih materijala i čvrstih gelova u reologiji hrane smatra se korisnim zbog činjenice da podaci često odgovaraju zaključcima tj. podacima senzorskih analiza.

Terminologija preuzeta iz Američkog društva za testiranje materijala, standard E-6 na slijedeći način opisuje velike deformacije kod mehaničkih pogreški hrane:

- Granica elastičnosti – najveće naprežanje koje može podnijeti materijal bez deformacije nakon što se vrati u prirodni položaj,
- Proporcionalna granica – najveće naprežanje koje materijal može podnijeti bez devijacije u odnosu na Hookov zakon
- Tlačna snaga – maksimalno tlačno naprežanje koje može podnijeti materijal
- Smicanje kod naprežanja – maksimalno smicanje koje materijal može podnijeti
- Vlačno prekidno naprežanje - maksimalno vlačno prekidno naprežanje koje materijal može podnijeti

- 
- Granica razvlačenja – prvo naprezanje u ispitivanju gdje nastaje povećanje naprezanja bez povećanja deformacije (Steffe, 1996.).

### **2.1.2 Tekući materijali**

Voda je važan sastojak mnogih namirnica i važna je za jestivost i postojanost hrane (Rao, 2014.). Tekuće namirnice su one koje ne zadržavaju svoj oblike već uzimaju oblik posude u kojoj se nalaze. Tekuće namirnice koje sadrže značajnu količinu otopljenih visoko molekularnih spojeva (polimeri) ili suspendirane krute tvari pokazuju Ne-Newtonovsko ponašanje. Mnoge Ne-Newtonovske namirnice pokazuju također i elastična i viskozna svojstva tj. pokazuju viskozno-elastična svojstva (Rao, 2014.). Na reološka svojstva namirnica utječe niz čimbenika posebno značajan utjecaj ima temperatura koja za Newtonovske tekućine utječe na viskoznost a kod ne-Newtonovskih na konzistenciju.

#### **2.1.2.1 Viskozitet**

Viskoznost (prema kasnolat. viscosus: ljepljiv) je trenje nastalo pri strujanju fluida (tekućine ili plina) zbog različite brzine gibanja njegovih slojeva. Uzrok viskoznosti su međumolekulske kohezijske sile u fluidu i adhezijske sile između fluida i krutoga tijela kroz koje se strujanje odvija (Hrvatska enciklopedija, 2016.).

Viskozitet se kod tekućih namirnica koristi da bi se opisao odnos smicanja i deformacije.

Viskozitet je najbolje mjeriti geometrijski gdje se stupanj smicanja može izračunati iz dimenzija mjernog sistema i eksperimentalnih podataka, kao što je brzina ili protok tekućine ili rotacijske brzine rotacijskog cilindra, klipa ili ploče.

Jednostavna brzina smicanja naziva se viskozimetrijski protok i uključuje aksijalni protok kroz cijev, rotacijski između koncentričnih cilindara; između klipa i ploče i torzijalni između paralelnih ploča. Tri funkcije materijala koje ovise o brzini tečenja (viskozimetrijske funkcije) su potrebne da bi se u potpunosti odredio stupanj deformacije u tekućini (Steffe, 1996.).



---


$$\eta = f(\gamma) = \frac{\sigma_{21}}{\gamma} \quad [2.2]$$

$$\psi_1 = f(\gamma) = \frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{(\gamma)^2} = \frac{N_1}{(\gamma)^2} \quad [2.3]$$

$$\psi_2 = f(\gamma) = \frac{\sigma_{22} - \sigma_{33}}{(\gamma)^2} = \frac{N_2}{(\gamma)^2} \quad [2.4]$$

$\eta$  = viskoznost

$\psi_1, \psi_2$  = koeficijenti stresa

$N_1 = (\sigma_{11} - \sigma_{22})$  tj. prva deformacijska razlika koja je uvijek pozitivna i oko 10 puta veća od  $N_2$

$N_2 = (\sigma_{22} - \sigma_{33})$  tj. druga deformacijska razlika (teško mjerljiva) – pretpostavka je da je  $N_2 = 0$ .

Ako je tekućina Newtonovska;  $\eta(\gamma)$  je konstanta i  $N_1$  i  $N_2$  su nula. Elastične tekućine pokazuju Newtonovsko ponašanje kada se  $\gamma$  približava nuli. Viskoznoelastične tekućine pokazuju viskozna (tekuća) i elastična (kruta) svojstva. Primjer takovoga reološkog ponašanja je tijesto.

### 2.1.2.2 Newtonovske tekućine

Newtonovske tekućine su tekućine u kojima je smično naprezanje direktno proporcionalno brzini smicanja i sve tekućine koje ne pokazuju ovakvo ponašanje se nazivaju ne-Newtonovske

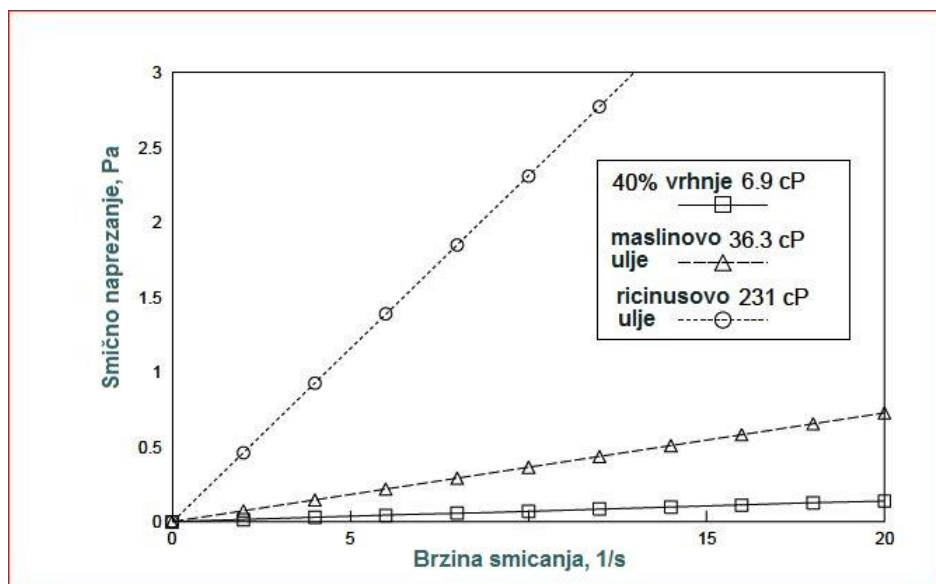
$$\sigma = \mu\gamma \quad [2.5]$$

$\sigma$  = smično naprezanje (Pa)

$\mu$  = koeficijent viskoznosti (Pa. s)

$\gamma$  = gradijent brzine između dvije plohe (brzina smicanja) ( $s^{-1}$ )

Newtonovske tekućine mogu se također opisati terminom kinetičke viskoznosti ( $\nu$ ) i objašnjava se kao dinamična viskoznost kroz gustoću ( $\mu/\rho$ ). Primjer toga su voda, mlijeko, med, voćni sokovi, biljna ulja.



Slika 3. Reogrami tipičnih Newtonovskih tekućina (Steffe, 1996)

Povećanje nagiba krivulje odgovara povećanju viskoznosti ispitivanog uzorka.

### 2.1.2.3 Ne-Newtonovske tekućine

Ne-Newtonovske tekućine (fluidi) pokazuju ponašanje opisano u jednažbi pod nazivom Herschel-Bulkey i mnogi fluidi ponašaju se prema njoj.

$$\sigma = K(\dot{\gamma})^n + \sigma_0 \quad [2.6]$$

$K$  = koeficijent konzistencije;

$n$  = indeks tečenja;

$\sigma_0$  = granično naprezanje

Ne-Newtonovske tekućine mogu se podijeliti u dvije skupine ovisno o vremenu smicanja

- Vremenski ovisne
  - Reopektičke
  - Tiksotropne
- Vremenski neovisne

- 
- Viskoelastične
  - Binghamovske
  - Pseudoplastične
  - Dilatantne

#### **2.1.2.4 Vremenski ovisni fluidi**

Neelastični materijali kod kojih smično naprezanje ovisi o brzini smicanja i vremenu.

Ovi materijali (fluidi) mogu spadati u tiksotropne i reopektične te pokazuju povećanje i smanjenje smičnog naprezanja tijekom vremena mjerenja pri stalnoj brzini smicanja.

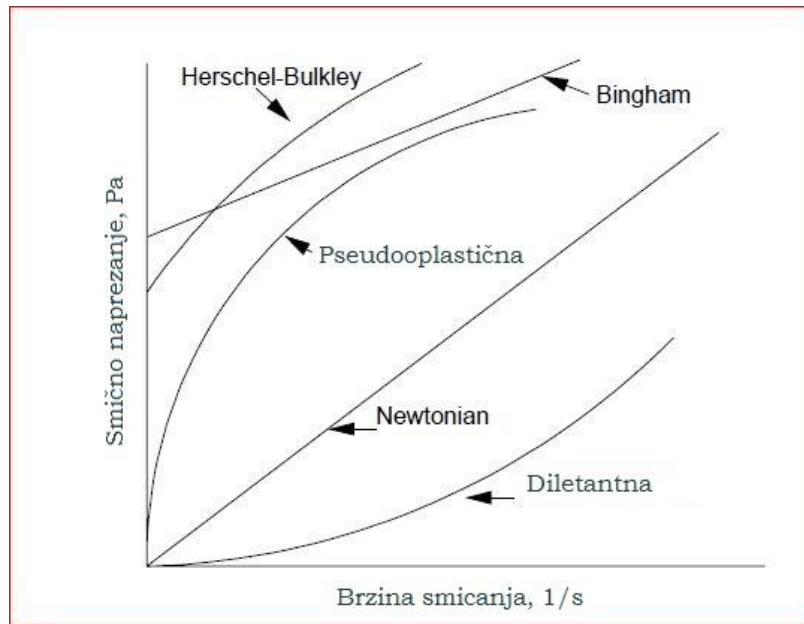
Tiksotropni fluidi - tiksotropni su sustavi oni kod kojih unutarnji otpor ovisi o primijenjenom naprezanju, trajanju naprezanja i prethodnim deformacijama, pri čemu dolazi do narušavanja strukture, a viskoznost se smanjuje s vremenom trajanja naprezanja. Kada prestane djelovanje naprezanja, dolazi do ponovnog uspostavljanja početne strukture i porasta viskoznosti (Lovrić, 2003.).

To u uglavnom sol-gel sustavi. Primjeri tih reoloških sustava su jogurt, koncentrat rajčice, škrobno ugušćena hrana, razne kreme.

Reopektički fluidi – kod ovih sustava konzistencija se povećava kako se povećava vrijeme naprezanja. Pod utjecajem smicanja povećava se viskoznost (konzistencija) i kada smicanje prestane viskoznost pada. Primjer ovih reoloških sustava (fluida) je tučeno vrhnje.

#### **2.1.2.5 Vremenski neovisni fluidi**

Kod ovih fluida brzina smicanja tijekom mjerenja reološkog sustava ovisi o lokalnom smičnom naprezanju



Slika 4. Krivulja tipičnih fluidi neovisnih o vremenu (Steffe, 1996.)

Viskoelastični fluidi – pri djelovanju smičnog naprezanja ovi fluidi pokazuju plastično i elastično ponašanje s time da nakon prestanka djelovanja naprezanja smicanje ne prestaje u potpunosti u materijalu. Primjer su reološka ponašanja tijesta i želirani proizvodi.

Binghamski plastični fluidi – tečenje materijala počinje kada se postigne određeni prag naprezanja ( $\sigma_0$ ).

Primjeri su sok naranče, margarin, biljne masti, čokoladne mase.

Pseudoplastični fluidi – smično naprezanje puno brže raste pri nižim brzinama smicanje nego pri višim i opisan je Oswald –Reinerovim zakonom potencije pri čemu je indeks tečenja  $n < 1$  i odnosi se na suspenzije ili tekućine u kojima su otopljeni visokomolekularne tvari kao što su: juhe od povrća, majoneza, senf, kondenzirano mlijeko i sl.

Dilatantni fluidi – smično naprezanje naglo raste kako se povećava brzina smicanja tj. viskoznost raste i otpor fluida je veći kod veće brzine smicanja. Isto kao i kod pseudoplastičnih fluida opisuje se Oswald –Reinerovim zakonom potencije s time da je  $n > 1$ . Primjer su koncentrirane suspenzije škroba i vode.

---

### 2.1.3 Instrumenti za mjerenje reoloških parametara – viskozimetri /reometri

Viskozimetar je instrument za mjerenje naprezanja i deformacije u materijalu nepoznatog sastava (Macosko, 1994.).

U ovisnosti od vrste hrane i njenim reološkim svojstvima ovisiti će i izbor viskozimetra za mjerenje reoloških svojstava.

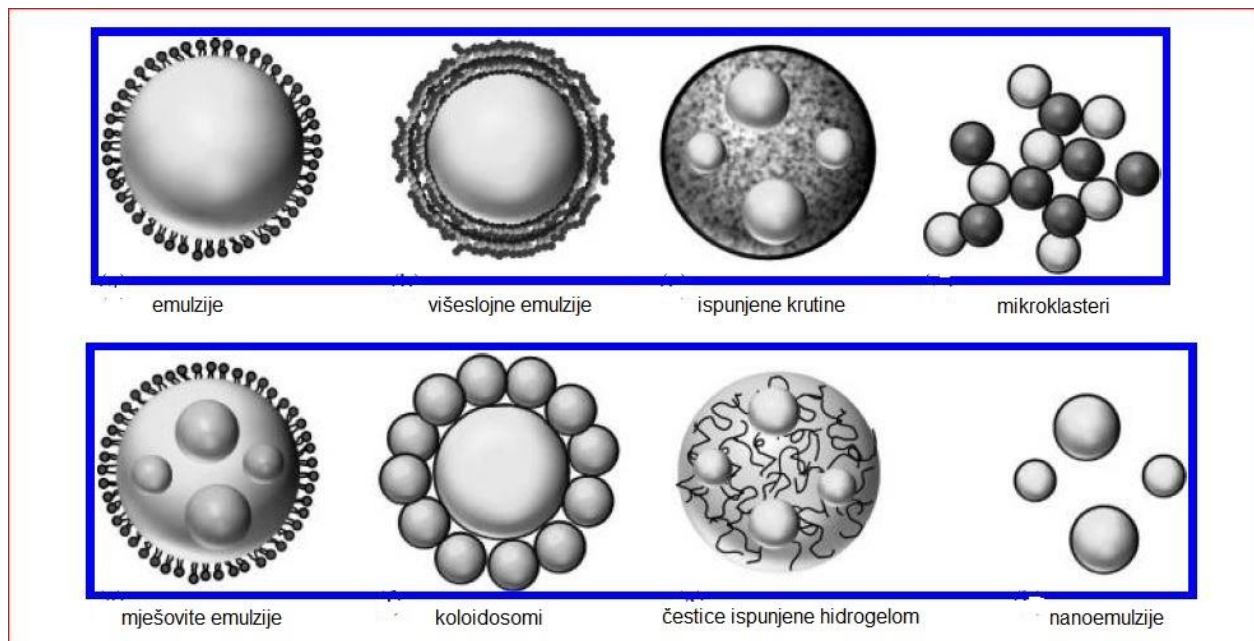
Postoji nekoliko tipova viskozimetara, ali najčešće se koriste rotacijski i kapilarni.

Rotacijski viskozimetri mogu biti različitih izvedbi, pa razlikujemo viskozimetre sa paralelnim pločama, koncentričnim cilindrima i sustav stožac-ploča. Pogodniji su za materijale čija brzina smicanja je ovisna o vremenu. Mjerenja rotacijskim viskozimetrom zasnivaju se na mjerenju kutne brzine rotirajućeg mjernog tijela i odgovarajućeg zakretnog momenta. Više se upotrebljavaju nego kapilarni viskozimetri zbog jednostavnijeg i praktičnijeg rada sa njima, a mjerenja se mogu provoditi u širokom rasponu viskoznosti različitih materijala (Lelas, 2006.).

Kapilarni viskozimetri rade na principu protjecanja materijala kroz cijev točno određenih dimenzija čime se mjeri protok tekućine i tlaka. Pogodni su za materijale čija brzina ne ovisi o vremenu, viskozitet je neovisan o tlaku, protok je laminaran i stalan.

## 2.2 EMULZIJE

Emulzije su sustavi koje se sastoje od dvije tekućine koje se ne miješaju, obično ulje i voda, s time da je jedna tekućina dispergirana u obliku sferičnih kapljica u drugoj (McClements, 2016.). Kod većine emulzija promjer kapljica je od 100 nm do 100  $\mu\text{m}$ . Emulzije se mogu klasificirati prema njihovoj relativnoj prostornoj raspodjeli uljne i vodene faze. Emulzije kod kojih su kapljice ulja raspršene u vodenoj fazi nazivaju se ulje/voda emulzije (majoneza, juhe, umaci, mlijeko). Ukoliko je obrnuto nazivaju se voda /ulje emulzije (maslac, margarin). Kod emulzija faza raspršenih kapljica, bilo voda ili ulje naziva se disperzna faza, a faza koja je okružuje naziva se kontinuirana faza. Osim klasičnih postoje i multiemulzije (voda/ulje/voda ili ulje/voda/ulje), nanoemulzije, višeslojne emulzije i drugi sustavi.



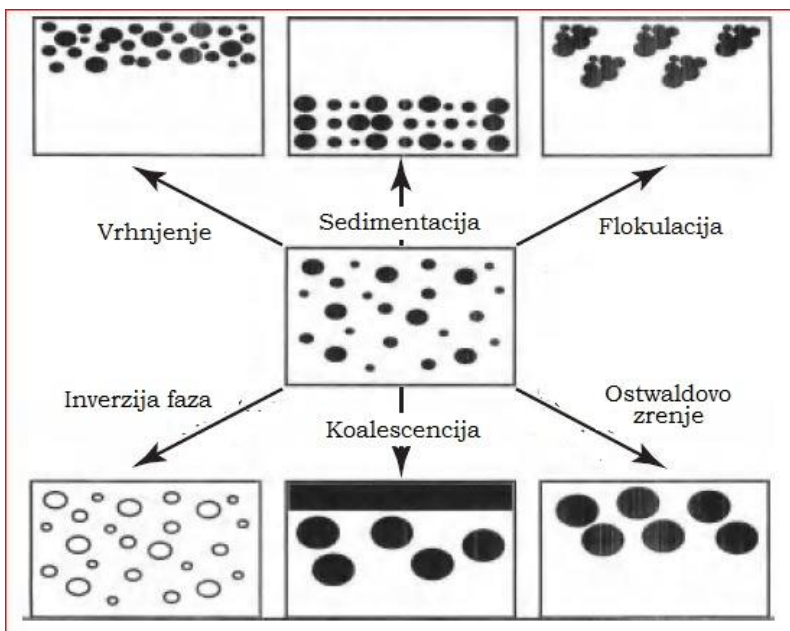
Slika 5. Primjer strukture emulzija koje se mogu koristiti u hrani (McClements, 2016.)

Proces kojim se dobivaju emulzije naziva se homogenizacija i uključuje uređaje koji rade na principu korištenja visokog stupnja energije i mehaničke uređaje (homogenizatori) (McClements, 2016.). Emulzije su termodinamički nestabilne i razdvajanje faza može se spriječiti kinetičkim faktorima (Chiralt, 2005.).

### 2.2.1 Stabilnost emulzija

Kada se govori o stabilnosti emulzija misli se prvenstveno na promjenu svojstava emulzije kroz određeni vremenski period. Na svojstva i stabilnost emulzija znatno utječe sastav površine raspršenih kapljica (ulje ili voda) jer je površina u direktnom kontaktu sa ostalim tvarima i na taj način u velikoj mjeri utječe na kinetiku stabilizacije. Dva medija koja se inače ne miješaju (tekuća ili plinovita) mogu se spojiti u određeni proizvod samo stabilizacijom granice površine koja okružuje raspršene kapljice ili mjehuriće da se ne bi spojile (Franck, 2005.).

Kao takve emulzije su potencijalno nestabilne jer s obzirom da se glavne komponente npr. ulje - voda tip emulzija ne miješaju i razlika u gustoći između njih vodi brzom razdvajanju ukoliko ne postoje kinetički faktori koji bi to spriječili (Chiralt, 2005.). Destabilizacija je posljedica djelovanja različitih sila: sila privlačenja između čestica, molekularnih i gravitacijskih sila. Emulzije mogu postati nestabilne kada na njih utječu različiti fizikalni i kemijski faktori. Fizikalna nestabilnost rezultira promjenom u prostornoj distribuciji ili strukturalnoj organizaciji molekula dok kemijska nestabilnost rezultira u promjeni vrste prisutnih molekula (McClements, 2016.). Kod stabilnosti također se spominju i termini termodinamička stabilnost – da li će doći do destabilizacije ili ne i kinetička stabilnost – ako dođe do destabilizacije kojom će se brzinom odvijati.

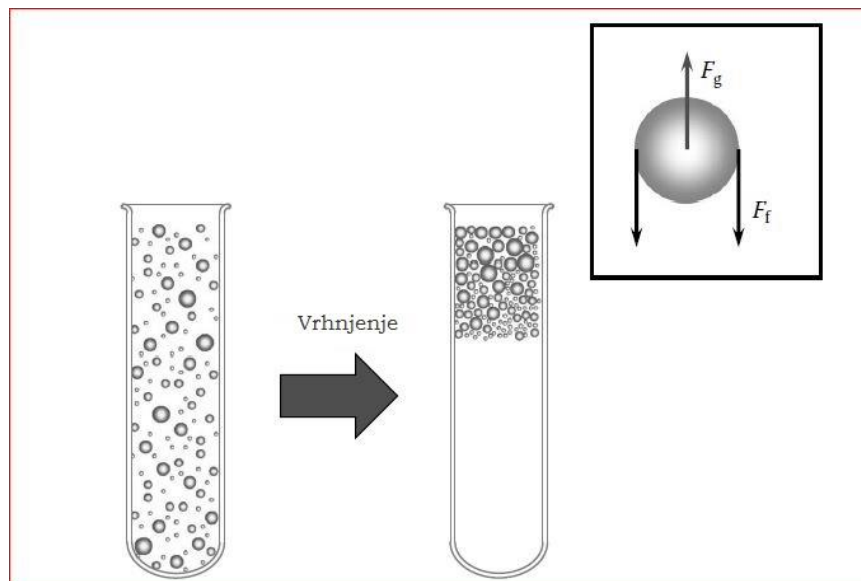


Slika 6. Shematski prikaz različitih procesa razdvajanja u emulzijama (Tadros, 2009.)

### 2.2.1.1 Fizikalni procesi destabilizacije emulzija

#### 2.2.1.1.1 Vrhnenje

Vrhnenje je proces razdvajanja sastojaka emulzije kretanjem emulzijskih kapljica prema gore ako kapljice imaju manju gustoću od tekućine koja ih okružuje (vrhnjenje) ili dolje ako imaju veću gustoću od tekućine koja ih okružuje (sedimentacija). Uzrok tome je obično gravitacijska sila, ali može biti i pod utjecajem centrifugalne sile. U ovoj vrsti destabilizacije kapljice emulzije ne gube svoju osobnost već se samo preraspodjeljuju u prostoru i mogu se vratiti u svoje originalno stanje miješanjem (Friberg i sur., 2004.). U uljno vodenim emulzijama vrhnjenje se očituje nakupljanjem kapljica ulja na površini emulzijske mješavine. U početku su vidljive kapljice ulja na površini da bi se s vremenom stvorila vidljiva razlika u slojevima. Mnogi faktori istodobno utječu na proces destabilizacije i ponekad ih je teško svrstati u jednadžbu stoga je poželjno koristiti u tim slučajevima računalnu simulaciju. Neki od načina kontrole ovih destabilizacija su: smanjenje razlike u gustoći kapljica, smanjenje veličine kapljica, modifikacija reologije kontinuirane faze, povećanje koncentracije kapljica itd.



Slika 7. Prehrambene emulzije su sklone vrhnjenju zbog razlike u gustoći između uljne i vodene faze (McClements, 2016.)



---

#### **2.2.1.1.2 Flokulacija**

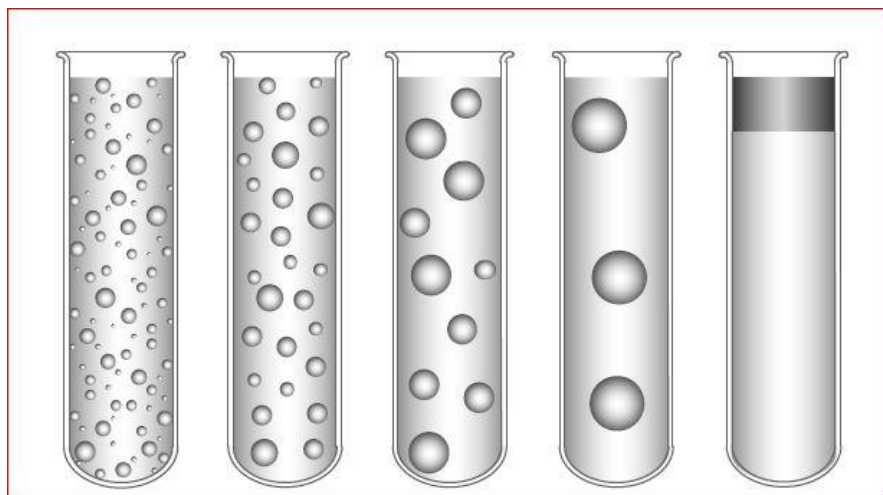
Proces u kojem se kapljice emulzije agregiraju (dvije ili više njih), ali zadržavaju svoja svojstva (veličinu čestica). Rezultat je van der Waalsovih veza koje su univerzalne za sve disperzne sustave. Flokulacija nastaje kada ne postoji dovoljno odbijanje da bi držalo kapljice na udaljenosti gdje su van der Waalsove veze slabe. Flokulacija može biti slaba ili jaka ovisno o energiji privlačenja (Tadros, 2009.). Flokulacija ubrzava gravitacijsko razdvajanje u razrijeđenim emulzijama (smanjuje vijek trajanja proizvoda) i povećava viskoznost, pa čak i stvaranje gela. Može se kontrolirati npr. kontrolom spajanja čestica ovisno o mehanizmu djelovanja (povećanje viskoznost kontinuirane faze), kontrolom koloidalnih i elektrostatkih interakcija itd.

#### **2.2.1.1.3 Koalascencija**

Proces u kojem se jedna ili više kapljica spajaju i stvaraju veću kapljicu. Proces se odvija u 4 faze:

- a) Spajanje kapljica u emulziji (ili u kremastom sloju razrijeđene emulzije) kroz neki od mehanizama flokulacije
- b) Stanjivanje filma između kapljica ovisno o koloidnim silama u filmu
- c) Puknuće filma
- d) Spajanje kapljica u potpunu ili djelomičnu koalescenciju ovisno o fizikalnom stanju ulja (tekuće ili djelomično kristalizirano)

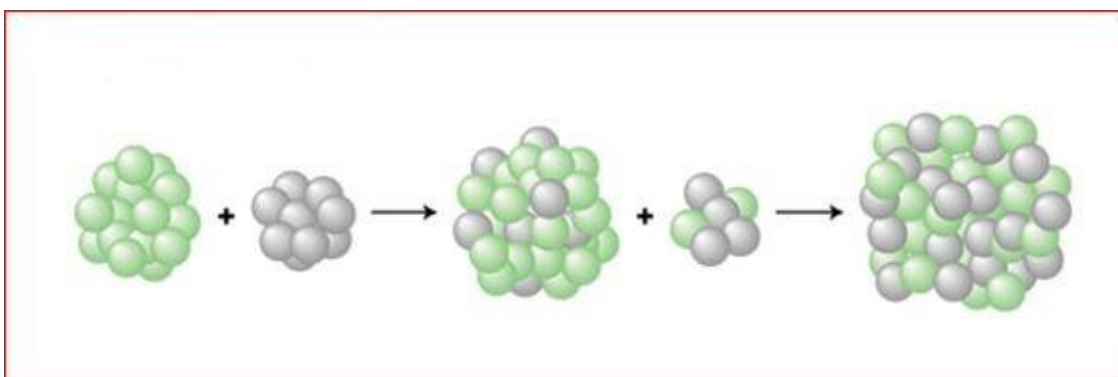
Brzina koalescencije ovisi o stabilnosti filma između kapljica. U procesu koalescencije bitne su krute tvari (npr. masti, proteini) koje pojačavaju puknuće filma i brzinu koalescencije. To je posebno bitno npr. u proizvodima gdje se polukristalizirane masnoće nalaze na granici ulje-voda i kod takovog proizvoda može doći do skrutnjavanja masnoće tijekom skladištenja ukoliko se npr. proizvod čuva u hladnjaku (Chiralt, 2005.). Kako koalescencija ovisi o koloidnim i hidrodinamičkim interakcijama i fizikalno-kemijskim svojstvima kontaktne površine kapljica, metoda kontrole nastanka ove destabilizacije ovisi najviše o emulgatoru koji se koristi za stabilizaciju sistema zajedno sa uvjetima u sistemu kao što su temperatura, ionska jakost, pH i sl.



Slika 8. Koalescencija kapljica vodi povećanju promjera kapljica i eventualno može voditi potpunom odvajanju uljne i vodene faze (McClements, 2016.)

#### 2.2.1.1.4 Ostwaldovo zrenje

Proces kod kojeg velike kapljice rastu na račun manjih u polidisperznim emulzijama zbog prijenosa mase disperzne faze sa jedne kapljice na drugu kroz kontinuiranu fazu (Kabalnov and Schunkin, 1992, Taylor1998, Kabalnov 2001). do ove destabilizacije dolazi zbog razlike u topivosti malih i velikih kapljica. Karakterizira ga ili konstantna brzina volumena ili konstantna brzina površine ovisno o podrijetlu mehanizma prijenosa (Calderon i sur., 2007.).

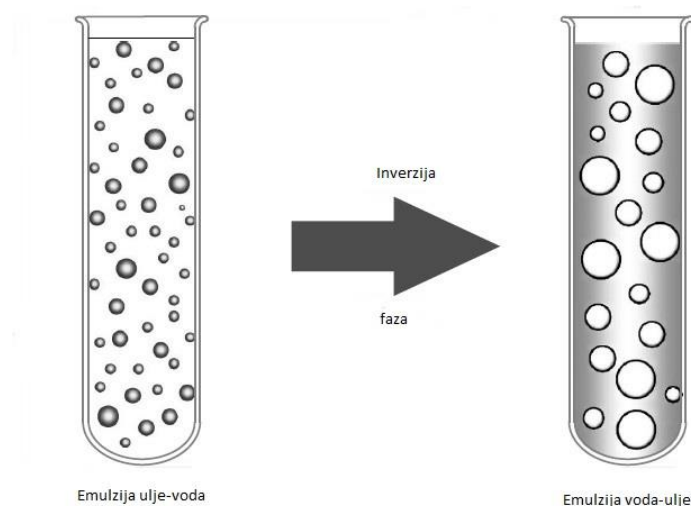


Slika 9. Ostwaldovo zrenje (Weiss, 2000.)

Ostwaldovo zrenje važno je u uljno-vodenim emulzijama koje sadrže više topljive uljne faze (eterična ulja, ulja koja daju aromu, kratkolančane tiacilglicerole i sl.). Na ovaj proces utječe veličina kapljica, granični prijelaz, granična napetost, topivost otopljene tvari i dr. Poznavanje ovih faktora koristi se za kontrolu ovog procesa destabilizacije.

#### 2.2.1.1.5 Inverzija faza

Inverzija faza je proces u kojem se sistem mijenja iz emulzijskog sistema ulje-voda u voda-ulje i obrnuto (McClements, 2016.). Ovaj proces je nužan u proizvodnji niza prehrambenih proizvoda (margarin, maslac), dok je u nekim drugim potpuno nepoželjan. Obično je uzrok neka od promjena u sastavu ili okolišu emulzije (koncentracija i tip emulgatora, aditivi, temperatura). S obzirom da za inverziju faza treba potaknuti emulziju jer je ovaj tip emulzija kinetički stabilan prije i nakon inverzije faza rijetki su proizvodi koji joj podliježu jer većina proizvoda ima tendenciju da se razdvoji prije nego stvori inverziju.



Slika 10. Inverzija faza uključuje prevođenje emulzije ulje-voda u voda-ulje ili obrnuto

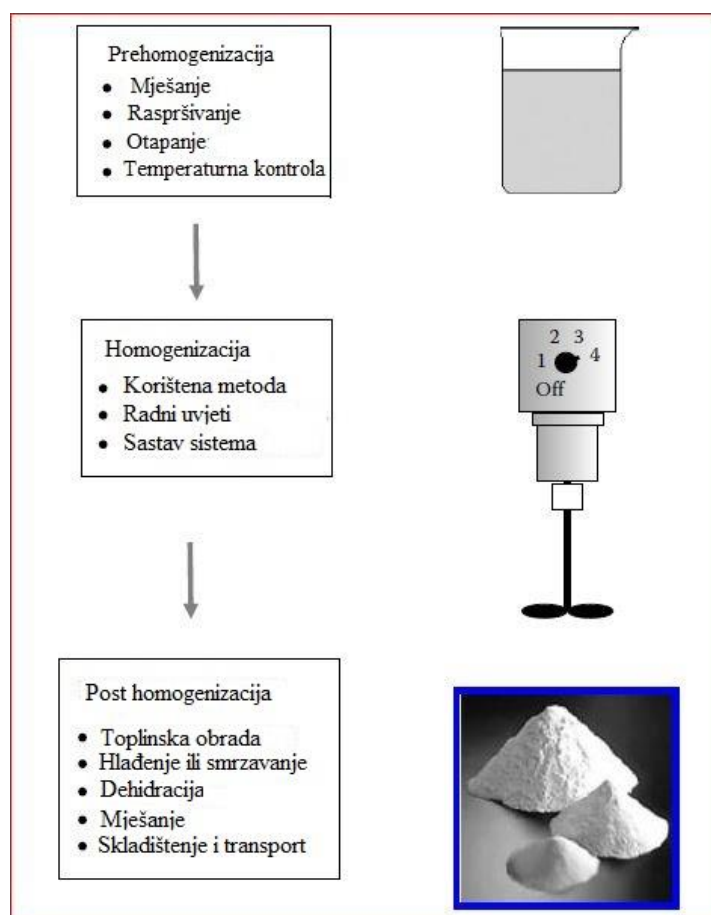
Ovisno o tome do kojih promjena dolazi postoje dvije vrste inverzije faza.

Inverzija izazvana površinski aktivnom tvari – promjena u molekularnoj geometriji monoslojem površinski aktivne tvari koja je korištena u početnoj emulziji zbog promjena u sastavu emulzije ili okolišu (temperatura, sol, alkohol ili površinski aktivna tvar) (Brooks i sur., 1998; Kabalnov, 1998.).

Inverzija faza izazvana kristalizacijom masti - promjena u emulziji koja vodi opsežnoj djelomičnoj koalescenciji (temperatura, smicanje ili promjena u debljini međupovršinskog sloja (Walstra, 2003.).

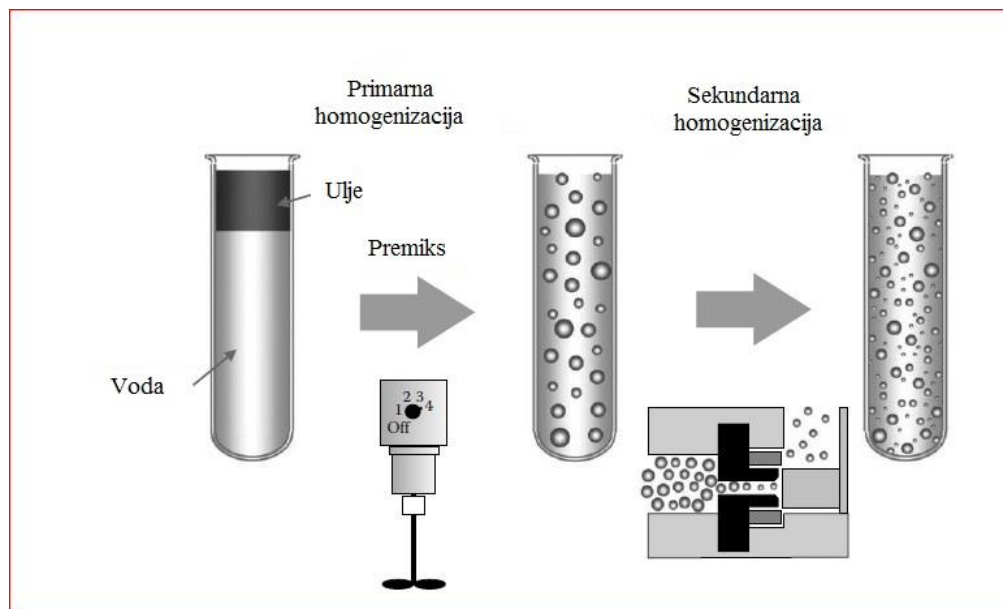
### 2.2.2 Stvaranje emulzija

Proces stvaranja emulzija može biti jednostepeni ili višestepeni ovisno o sirovinama i metodama koje se koriste. Da bi emulzija nastala treba raspršiti jednu komponentu u drugoj i stvoriti graničnu fazu između njih, pri čemu je potrebna energija (mehanička) i površinski aktivna tvar. Energija je potrebna jer je granična površina između dvije faze povećana i stoga se povećava i granična slobodna energija sistema. Površinski aktivna tvar sprječava koalescenciju, smanjuje površinsku napetost i pospješuje razbijanje većih kapljica na manje (Walstra, 2003.).



Slika 11. Nastajanje emulzija može uključivati niz različitih procesa koje se mogu odvijati prije, nakon ili tijekom homogenizacije.

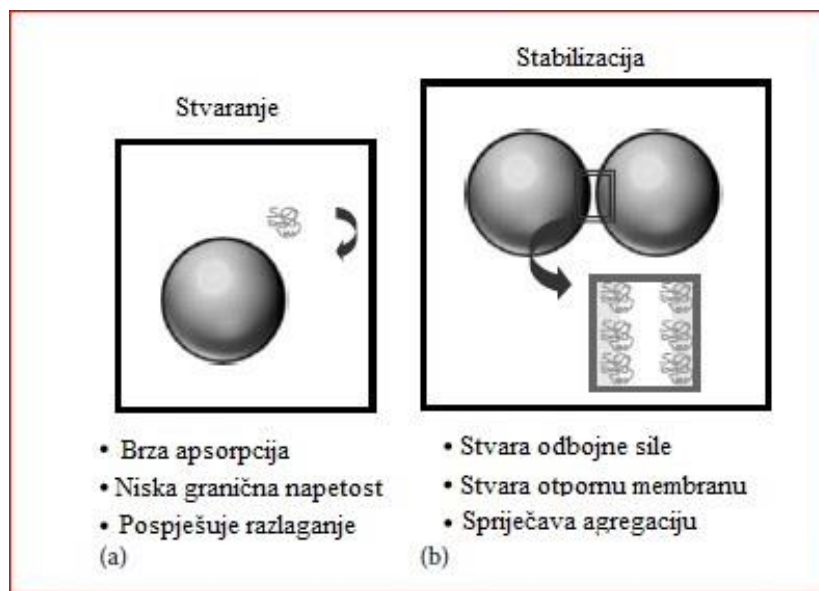
Kрупnije emulzije (20-50  $\mu\text{m}$ ) mogu se pripremiti snažnim miješanjem, a fine emulzije ( $\approx 1\mu\text{m}$ ) uglavnom sa homogenizatorima i ta metoda se najčešće koristi u industriji (Chiralt, 2009.). Postoje 2 vrste homogenizacije, primarna (direktno iz dvije odvojene tekućine) i sekundarna (smanjenje veličine kapljica u već postojećoj emulziji).



Slika 12. Primarna i sekundarna homogenizacija

Fizikalno-kemijski dio stvaranja emulzija može se opisati kroz primjer ulje-voda. Ove dvije tekućine ne miješaju se i kada se stave zajedno u posudu imaju tendenciju zauzimanja termodinamički najstabilnijeg stanja odnosno ulje je uvijek iznad vode. Da bi se ove dvije tekućine pomiješale tj. stvorile emulziju na njih je potrebno primijeniti mehaničku energiju. Nakon primjene energije npr. mućkanje dolazi do stvaranja emulzije ali kako manje raspršene kapljice ulja ipak dolaze u kontakt jedna sa drugom i formiraju veće kapljice one zbog gravitacijske sile putuju prema gore i uljna faza ponovno dolazi iznad vodene. Razlog tomu je hidrofobni efekt i već spomenuta gravitacijska sila. Da bi se stvorila kinetički stabilna emulzija potreban je dodatak koji će spriječiti spajanje manjih kapljica u veće i on se naziva emulgator. Uloga emulgatora je napraviti i stabilizirati emulziju tj. smanjiti površinsku napetost i stvoriti barijeru između faza. Odabir emulgatora vrlo je važan i često se koristi smjesa emulgatora jer

emulgator se mora vrlo brzo apsorbirati na površinu novonastalih kapljica da bi spriječio napetost površine i napraviti zaštitni sloj oko kapljica da ne bi došlo do koalescencije, Isto tako njegovo djelovanje mora biti dugotrajno jer mnogi faktori mogu utjecati na stabilnost novonastale emulzije tijekom njenog vremenskog roka trajanja kao što je interakcija komponenti, temperatura, pH i sl.



Slika 13. Emulgator ima dvije važne uloge u određivanju ukupnih svojstava prehrambenih emulzija: (a) stvaranje emulzija i (b) stabilnost emulzija

Brojna fizikalno-kemijska, senzorska i nutricionistička svojstva prehrambenih emulzija ovise o veličini kapljica koje sadrže, uključujući stabilnost, teksturu, okus, izgled i probavljivost. Glavni cilj homogenizacije je stoga stvoriti emulziju sa raspodjelom veličine čestica za koje se zna da pružaju poželjna svojstva za određeni proizvod (McClements, 2016.).

### 2.2.3 Dodaci emulzijama

Emulzije su vrlo kompleksne u svom sastavu i strukturi te sadrže niz dodataka kao što su emulgatori, ugušćivači, konzervansi, antioksidanti, sol, ugljikohidrati, arome, boje, masnoće itd. Senzorska i nutricionistička svojstva uvelike ovise o vrsti sastojaka, njihovoj fizičkoj lokaciji i njihovom međusobnom djelovanju.

---

### **3 EKSPERIMENTALNI DIO**



---

## 3.1 ZADATAK

Zadatak ovog rada je ispitati utjecaj procesnih parametara homogenizacije na reološka svojstva emulzije ulje/voda sa 70% uljnom komponentom.

Od procesnih parametara ispitati će se različite brzine rotora homogenizatora (10 000, 12 000, 15000 °/min i vrijeme trajanja homogenizacije (3,5,7 min) na promjenu reoloških svojstava emulzije. Također će se istražiti utjecaj posebnih sastojaka na reološka svojstva emulzije ulje/voda.

Sastojci koji će se mjeriti u recepturi su mliječna komponenta (Obrano mlijeko u prahu, punomasno mlijeko u prahu, sojino mlijeko u prahu, sirutka u prahu), žumanjak kokošnjeg jajeta (svježi žumanjak, svježi pasterizirani žumanjak, cijelo jaje u prahu) i vrsta ugljikohidrata (saharoza, glukoza, laktoza, inulin HD, javorov sirup).

## 3.2 MATERIJALI I METODE

### 3.2.1 Materijali

Materijali korišteni za pripremu emulzije ulje voda:

1. Ulje – rafinirano suncokretovo ulje; rafinirano ulje kukuruzne klice 70 %;
2. Mliječna komponenta – punomasno mlijeko u prahu, obrano mlijeko u prahu, sirutka u prahu, sojino mlijeko u prahu 5%;
3. Ugljikohidrati – saharoza, glukoza, laktoza, inulin HD, javorov sirup 2,5%;
4. Žumanjak kokošnjeg jajeta - svježi, svježi pasterizirani, cijelo jaje u prahu 8%;
5. Morska sol 1%;
6. Destilirana voda 13,5 %;

---

## **3.2.2 Metode**

### **3.2.2.1 Priprema emulzije ulje/voda**

Sva mjerenja provedena su sa pripremljenom masom uzorka od 200 g.

Kod pripreme potrebno je samljeti sol i šećer u prah i odvagati u posebne posudice. Ostale sastojke (mlijeko u prahu, žumanjak, vodu), također odvagati u posebne posudice. U čašu u kojoj će se homogenizirati uzorak uliti 1/3 ulja i dodati sve ostale sastojke. Vrlo je bitno da su svi sastojci iste temperature. Lagano homogenizirati oko 20 sekundi, a zatim lagano uz homogenizaciju dodati preostalo ulje. Homogenizirati određenom brzinom (10 000, 12 000, 15 000 °/min) zadano vrijeme (3, 5, 7 min). Priprema emulzije ulje/voda sa 70% uljnom komponentom napravljena je korištenjem laboratorijskog homogenizatora (model D 500) Wiggenhauser sa područjem brzine rotora 10 000 – 30 000 °/min. Svježe sisteme emulzija ulje/voda potrebno je izmjeriti na rotacijskom viskozimetru sa koncentričnim cilindrom.

**Tablica 1.** Osnovni sastojci za pripremu emulzija za ispitivanje utjecaja ugljikohidrata na reološka svojstva emulzije ulje voda.

<b>Uzorak / komponenta</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<b>Suncokretovo ulje, %</b>	70	70	70	70	70	*	*	*	*	*
<b>Ulje kukuruzne klice, %</b>	*	*	*	*	*	70	70	70	70	70
<b>Voda, %</b>	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5
<b>Mliječna komponenta (sojino mlijeko u prahu), %</b>	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
<b>Žumanjak (svježi), %</b>	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
<b>Sol, %</b>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<b>Šećer, %</b>										
<b>Glukoza, %</b>	5	*	*	*	*	5	*	*	*	*
<b>Saharoza, %</b>	*	5	*	*	*	*	5	*	*	*
<b>Laktoza, %</b>	*	*	5	*	*	*	*	5	*	*
<b>Javorov sirup, %</b>	*	*	*	5	*	*	*	*	5	*

<b><i>Inulin HD, %</i></b>	*	*	*	*	5	*	*	*	*	5
----------------------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

**Tablica 2.** Osnovni sastojci za pripremu emulzija za ispitivanje utjecaja mliječne komponente na reološka svojstva emulzije ulje voda.

<b>Uzorak / komponenta</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>
<b>Suncokretovo ulje, %</b>	70	70	70	70	*	*	*	*
<b>Ulje kukuruzne klice, %</b>	*	*	*	*	70	70	70	70
<b>Voda, %</b>	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5
<b>Šećer (saharoza), %</b>	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
<b>Žumanjak (svježi), %</b>	8	8	8	8	8	8	8	8
<b>Sol, %</b>	1	1	1	1	1	1	1	1
<b>Mliječna komponenta, %</b>								
<b><i>Sojino mlijeko u prahu, %</i></b>	5	*	*	*	5	*	*	*
<b><i>Punomasno mlijeko u prahu, %</i></b>	*	5	*	*	*	5	*	*
<b><i>Obrano mlijeko u prahu, %</i></b>	*	*	5	*	*	*	5	*
<b><i>Sirutka u prahu, %</i></b>	*	*	*	5	*	*	*	5

**Tablica 3.** Osnovni sastojci za pripremu emulzija za ispitivanje utjecaja žumanjka na reološka svojstva emulzije ulje voda.

<b>Uzorak / komponenta</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>
<b>Suncokretovo ulje, %</b>	70	70	70	*	*	*
<b>Ulje kukuruzne klice, %</b>	*	*	*	70	70	70
<b>Voda, %</b>	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5
<b>Šećer (saharoza), %</b>	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
<b>Mliječna komponenta (sojino mlijeko u prahu), %</b>	5	5	5	5	5	5
<b>Sol, %</b>	1	1	1	1	1	1
<b>Žumanjak, %</b>						
<b><i>Svježi, %</i></b>	5	*	*	5	*	*
<b><i>Svježi pasterizirani, %</i></b>	*	5	*	*	5	*
<b><i>Cijelo jaje u prahu, %</i></b>	*	*	5	*	*	5

### 3.2.2.2 Mjerenje reoloških svojstava

Mjerenje reoloških parametara izvršeno je na uređaju Rheomat 15T

Rheomat ima konusna mjerna tijela i cilindrične posude u koje se stavlja uzorak te uranja odgovarajuće mjerno tijelo. Sastoji od mjerne glave, cilindrične posude sa odgovarajućim konusnim mjernim tijelima i elektronske jedinice. Mjerna glava se sastoji od posebno konstruiranog mehanizma za mjerenje zakretnog momenta. Na donjem dijelu mjerne glave učvršćuje se mjerno tijelo, dok se na gornjem dijelu nalazi skala sa kazaljkom podijeljena na vrijednosti 1- 100%. Tijekom mjerenja kazaljka uređaja pokazuje % odklona skale koji je proporcionalan zakretnom momentu, koji ovisi o viskozitetu, odnosno konzistenciji uzorka u koje je mjerno tijelo uronjeno. Uz svako mjerno tijelo ide odgovarajuća cilindrična posuda u koju se stavlja uzorak čija se reološka svojstva određuju, a u uzorak se uranja odgovarajuće mjerno tijelo. Određeno mjerno tijelo i cilindrična posuda s istom oznakom čine određeni mjerni sustav. Postupak mjerenja reoloških svojstava emulzije ulje-voda izrađeno je na mjernom sustavu B pri 25°C.



Slika 14. Rheomat 15T

---

Mjerenjem pri sobnoj temperaturi (25°C) praćena je ovisnost smičnog naprežanja ( $\tau$ ) i prividna viskoznost ( $\mu$ ) o brzini smicanja (D) pri brzinama smicanja od 2,18 s<sup>-1</sup> do 137,1 s<sup>-1</sup> (uzlazno mjerenje) i od 137,1 s<sup>-1</sup> do 2,18 s<sup>-1</sup> (povratno mjerenje).

### 3.2.2.3 Izračun reoloških parametara

Reološka svojstva ispitivanih uzoraka emulzija ulje/voda određeni su reološkim parametrima. Vrijednost reoloških parametara koeficijenta konzistencije (k) i indeksa tečenja (n) su izračunate primjenom metode linearne regresije u Microsoft Excel programu.

Iz dijagrama ovisnosti smičnog naprežanja ( $\tau$ ) o brzini smicanja (D) ulje/voda emulzije ispitivanih uzoraka spadaju u ne-Newtonovske tekućine i s obzirom na to odabire se odgovarajuća jednadžba za izračunavanje koeficijenta konzistencije (k) i indeksa tečenja (n).

Svrstavaju se u pseudoplastične tekućine sa manje ili više izraženim tiksotropnim svojstvima.

Na temelju toga, za izračun reoloških parametara koeficijenta konzistencije

(k) i indeksa tečenja (n) primijenjen je Ostwald-Reinerov "stupnjeviti zakon":

$$\tau = k \times D^n \quad [3.1]$$

$\tau$  = smično naprežanje (Pa)

D = brzina smicanja (s<sup>-1</sup>)

k = koeficijent konzistencije (Pa.s<sup>n</sup>)

n = indeks tečenja

---

Izračunavanje prividne viskoznosti je provedeno primjenom izraza:

$$\mu = k \times D^{n-1} \quad [3.2]$$

Na dijagramu logaritamskih vrijednosti smičnog naprezanja i brzine smicanja, aproksimacijom dobivenih točaka, dobije se pravac čiji nagib predstavlja indeks tečenja. Točniju vrijednost za indeks tečenja dobijemo računskim putem pomoću jednadžbe linearne regresije:

$$a = \bar{y} - b \cdot \bar{x} \quad [3.3]$$

$$b = \frac{s_{xy} - \bar{y}s_x}{s_x^2 - \bar{x}s_x} \quad [3.4]$$

$$Y = a + b \cdot x \quad [3.5]$$

Uvrštavanjem izraza „a“ u jednadžbu linearne regresije dobije se pojednostavljeni oblik:

$$Y = \bar{y} - b\bar{x} + bx = \bar{y} + b(x - \bar{x}) \quad [3.6]$$

b = koeficijent smjera ili nagib pravca (b=n)

x i y = variable (x= logD, y=logτ)

$\bar{x}$  i  $\bar{y}$  = aritmetička sredina x i y

Koeficijent konzistencije (k) za pseudoplastične tekućine izračunava se iz jednadžbe:



---


$$\tau = k \times D^n \quad [3.7]$$

Logaritmiranjem ovu jednadžbu prevodimo u oblik jednadžbe pravca:

$$\log \tau = \log k + n \log D \quad [3.8]$$

Indeks tečenja (n) predstavlja koeficijent smjera ili nagib pravca (n=b) i izračunava se po navedenoj jednadžbi za „b“.

Koeficijent konzistencije (k) se izračunava tako da se u gornju jednadžbu uvrste odgovarajuće vrijednosti za  $\log \tau$  i  $\log D$  za neku točku koja se nalazi na pravcu.

$$\log k = \log \tau - n \log D \quad [3.9]$$

Iz  $\log k$  se antilogaritmiranjem izračunava koeficijent konzistencije u (Pa·s<sup>n</sup>).

Točniju vrijednost za parametar k dobijemo izračunavanjem linearne regresije za neku od točaka prema jednadžbi:

$$Y = \bar{y} + b(x - \bar{x}) \quad [3.10]$$

Dobivena vrijednost Y odgovara određenoj vrijednosti  $\log \tau$  za određeni x, odnosno  $\log D$ . Uvrštavanjem dobivene vrijednosti u jednadžbu izračunava se koeficijent konzistencije (k).

## **4    REZULTATI**

**Tablica 4.** Utjecaj vrste ugljikohidrata udjela 2,5% na reološke parametre emulzije ulje/voda (5% sojino mlijeko u prahu, 8% svježi žumanjak), mjereno pri 25°C.

Uzorak		$\mu$ (pri 137,1 s <sup>-1</sup> ) (Pa.s)	k (Pa.s <sup>n</sup> )	n	R <sup>2</sup>
		Suncokretovo ulje (70%)			
1.	Glukoza	111,90	14,308	0,4198	0,96661
2.	Saharoza	122,82	16,597	0,4084	0,98923
3.	Laktoza	127,66	14,432	0,4446	0,98407
4.	Javorov sirup	114,97	16,313	0,3986	0,98455
5.	Inulin HD	170,15	26,683	0,3777	0,97555
		Ulje kukuruzne klice (70%)			
6.	Glukoza	127,55	17,071	0,4163	0,98758
7.	Saharoza	149,50	22,107	0,3963	0,98544
8.	Laktoza	133,53	17,866	0,4196	0,98875
9.	Javorov sirup	97,48	11,748	0,4321	0,98265
10.	Inulin HD	153,25	22,613	0,3924	0,98684

$\mu$  = prividna viskoznost kod brzine smicanja 137,1 (Pa.s)

$k$  = koeficijent konzistencije (Pa.s<sup>n</sup>)

$n$  = indeks tečenja

$R^2$  = koeficijent determinacije

**Tablica 5.** Utjecaj vrste mliječne komponente udjela 5% na reološke parametre emulzije ulje/voda (2,5% saharoza, 8% svježi žumanjak), mjereno pri 25°C.

Uzorak		$\mu$ (pri 137,1 s <sup>-1</sup> ) (Pa.s)	k (Pa.s <sup>n</sup> )	N	R <sup>2</sup>
		Suncokretovo ulje (70%)			
11.	Sojino mlijeko u prahu	122,82	16,597	0,4084	0,98923
12.	Punomasno mlijeko u prahu	90,07	8,762	0,4758	0,98675
13.	Obrano mlijeko u prahu	205,94	23,293	0,4439	0,99562
14.	Sirutka u prahu	87,73	7,243	0,5092	0,99581
		Ulje kukuruzne klice (70%)			
15.	Sojino mlijeko u prahu	149,50	22,107	0,3963	0,98544
16.	Punomasno mlijeko u prahu	84,66	7,743	0,5492	0,98629
17.	Obrano mlijeko u prahu	212,88	21,027	0,4714	0,99482
18.	Sirutka u prahu	81,97	6,806	0,5682	0,99040

**Tablica 6.** Utjecaj žumanjka jajeta udjela 8% na reološke parametre emulzije ulje/voda (2,5% saharoza, 5% sojino mlijeko u prahu), mjereno pri 25°C.

Uzorak		$\mu$ (pri 137,1 s <sup>-1</sup> ) (Pa.s)	k (Pa.s <sup>n</sup> )	N	R <sup>2</sup>
		Suncokretovo ulje (70%)			
19.	Svježi	122,82	16,597	0,4084	0,98923
20.	Pasterizirani	179,03	27,602	0,3811	0,99117
21.	Cijelo jaje u prahu	90,31	12,043	0,4117	0,99444
		Ulje kukuruzne klice (70%)			
22.	Svježi	149,50	22,107	0,3963	0,98544
23.	Pasterizirani	156,32	22,672	0,3428	0,99331
24.	Cijelo jaje u prahu	63,67	6,256	0,4747	0,98779

**Tablica 7.** Utjecaj brzine rotora homogenizatora na reološke parametre emulzije ulje/voda (2,5% sahara, 5% sojino mlijeko u prahu, 8% svježi žumanjak), mjereno pri 25°C.

Uzorak		$\mu$ (pri 137,1 s <sup>-1</sup> ) (Pa.s)	k (Pa.s <sup>n</sup> )	n	R <sup>2</sup>
		Suncokretovo ulje (70%)			
25.	10 000 %/min	122,82	16,597	0,4084	0,98923
26.	12 000 %/min	173,99	28,629	0,3679	0,96782
27.	15 000 %/min	218,44	40,243	0,3447	0,98815
		Ulje kukuruzne klice (70%)			
28.	10 000 %/min	149,50	22,107	0,3963	0,98544
29.	12 000 %/min	166,46	23,824	0,3898	0,99062
30.	15 000 %/min	222,02	28,458	0,3184	0,99809

**Tablica 8.** Utjecaj vremena homogenizacije na reološke parametre emulzije ulje/voda (2,5% sahara, 5% sojino mlijeko u prahu, 8% svježi žumanjak), mjereno pri 25°C.

Uzorak		$\mu$ (pri 137,1 s <sup>-1</sup> ) (Pa.s)	k (Pa.s <sup>n</sup> )	n	R <sup>2</sup>
		Suncokretovo ulje (70%)			
31.	3 min	122,82	16,597	0,4084	0,98923
32.	5 min	176,31	25,188	0,3966	0,99083
33.	7 min	229,92	47,798	0,3201	0,98582
		Ulje kukuruzne klice (70%)			
34.	3 min	149,50	22,107	0,3963	0,98544
35.	5 min	165,57	24,432	0,3901	0,99297
36.	7 min	175,97	28,981	0,3677	0,99096

## **5 RASPRAVA**



---

## 5.1 UTJECAJ SASTOJAKA NA REOLOŠKA SVOJSTVA EMULZIJE ULJE/VODA

Rezultati ispitivanja utjecaja sastojaka (ugljikohidrati, mliječna komponenta, žumanjak kokošjeg jajeta) na reološka svojstva prikazana reološkim parametara emulzije – ulje/voda mjerene pri 25° C, prikazani su u tablicama 4 – 6.

U Tablici 4. vidljivi su rezultati utjecaja ugljikohidrata (glukoza, saharoza, laktoza, javorov sirup, inulin HD), udjela 2,5% na promjenu reoloških sredstava emulzije ulje/voda slične majonezi. Standardni (kontrolni) uzorak emulzije ulje/voda izrađen je sa suncokretovim uljem i disaharidom saharozom. Mjerenjem reoloških svojstava ove emulzije (uzorak 2) i izračun reoloških parametara dobivene su vrijednosti prividne viskoznosti ( $\mu$ ) 122,82 (Pa.s) kod brzine smicanja 137,1 ( $s^{-1}$ ). Konzistencija emulzije izražena preko parametara koeficijenta konzistencije (k) imala je vrijednost 16,597 (Pa.s<sup>n</sup>) i indeks tečenja ( $\eta$ ) 0,4084. Vrijednost parametara indeksa tečenja je manja od 1 ( $\eta < 1$ ) što ukazuje na to da je emulzija ulje/voda ne-Newtonska tekućina i to pseudoplastičnog tipa. Izradom emulzije sa disaharidom laktozom (uzorak 3) dobivena je emulzija podjednake vrijednosti prividne viskoznosti ( $\mu$ ) i konzistencije. Emulzija izrađena sa monosaharidom glukozom ostvaruje nanižu vrijednost prividne viskoznosti ( $\mu$ ) 111,9 (Pa.s) i koeficijenta konzistencije (k) 14,308 (Pa.s<sup>n</sup>) te veći indeks tečenja. Primjenom javorovog sirupa ostvarena je nešto veća vrijednost prividne viskoznosti ( $\mu$ ) koeficijenta konzistencije (k) u odnosu na glukozu. Međutim, viskoznost i konzistencija emulzije ulje/voda pokazuje znatno veću vrijednost kada se od ugljikohidrata koristi inulin HD. Izračunom je utvrđena najniža vrijednost parametra indeksa tečenja (0,3777).

Kod ispitivanja utjecaja vrste ugljikohidrata na reološka svojstva emulzije ulje/voda izrađene sa uljem kukuruzne klice također se zapaža da primjena inulina HD rezultira najvećom vrijednosti prividne viskoznosti i konzistencije. Ovdje je emulzija sa javorovim sirupom imala znatno najnižu viskoznost i konzistenciju, a najveći indeks tečenja. S obzirom da je tendencija proizvesti emulziju ulje/voda što sličniju majonezi potrebno je dobiti što veću viskoznost i konzistenciju emulzije. Primjenom inulina HD sa suncokretovim uljem ostvaruje se veća konzistencija i viskoznost emulzije u odnosu na primjenu ulja kukuruzne klice. Ovakav rezultat je poželjan s obzirom da je ulje kukuruzne klice znatno skuplje od suncokretovog ulja što se odražava i na cijenu proizvoda ove emulzije koja je po sastavu vrlo slična majonezi.

---

U Tablici 5 prikazan je utjecaj vrste mliječne komponente (sojino mlijeko u prahu, punomasno mlijeko u prahu, obrano mlijeko u prahu, sirutka u prahu) udjela 5% na reološka svojstva tj. parametre emulzije ulje/voda mjerene pri 25°C.

Kontrolni uzorak emulzije izrađen sa sojinim mlijekom u prahu pri čemu su dobivene prethodno spomenute vrijednosti reoloških parametara.

Emulzija izrađena sa suncokretovim uljem i obranim mlijekom u prahu (uzorak 13) pokazuje veće vrijednosti prividne viskoznosti ( $\mu$ ) 205,94 (Pa.s) i koeficijenta konzistencije (k) 23,293 (Pa.s<sup>n</sup>) u odnosu na druge ispitivane mliječne sastojke.

Najmanja vrijednost viskoznosti i konzistencije ostvarena je primjenom sirutke u prahu ( $\mu$  = 87,73 Pa.s, k=7,243 Pa.s<sup>n</sup>). Korištenjem sojinog mlijeka u prahu proizvedena je emulzija veće viskoznosti i konzistencije nego pri korištenju punomasnog mlijeka u prahu. Razlog zašto emulzija proizvedena od punomasnog mlijeka u prahu ima veću viskoznost i konzistenciju može se objasniti iz sastava tog mlijeka. Obrano mlijeko nema masnu fazu (mliječna mast) te je udio proteinskog dijela visok i stoga utječu na porast viskoznosti proizvoda pri čemu djeluju kao ugušćivači u emulziji. Također ista pojava je zapažena kod emulzije izrađene sa 70% uljne faze ulja kukuruzne klice. Emulzija sa uljem kukuruzne klice ima manju konzistenciju, a veći indeks tečenja u odnosu na primjenu suncokretovog ulja.

U Tablici 6 prikazani su rezultat ispitivanja utjecaja žumanjka kokošnjeg jajeta (sviježi, pasterizirani, cijelo jaje u prahu) udjela 8% na reološke parametre emulzije ulje/voda mjereno pri 25°C .

Kontrolni uzorak emulzije izrađen je sa svježim žumanjkom jajeta.

Izradom emulzije sa pasteriziranim žumanjkom i suncokretovim uljem (uzorak 20) dobivena je najveća vrijednost prividne viskoznosti ( $\mu$ ) koja iznosi 179,03 (Pa.s) i konzistencije izražene sa koeficijentom konzistencije (k) 27,602 (Pa.s<sup>n</sup>), a niža vrijednost indeksa tečenja ( $\eta$ ). Razlog tome je što se pasterizacijom svježeg žumanjka jajeta termički djeluje na proteine i fosfolipide žumanjka koji imaju funkciju emulgatora čime je izostala njihova uloga smanjenja površinske napetosti između kapljica ulja i kontinuirane vodene faze.

---

Emulzija izrađena sa svježim žumanjkom ima nižu vrijednost viskoziteta i konzistencije jer žumanjak nije termički tretiran pa njegovi proteini i fosfolipidi utječu na smanjene površinske napetosti uljne i vodene faze emulzije.

Primjenom cijelog jajeta u prahu (žumanjak i bjelanjak) proizvela se emulzija ulje/voda sa niskom prividnom viskoznošću 90,31 (Pa.s) i koeficijenta konzistencije 12,043 (Pa.s<sup>n</sup>), a većim indeksom tečenja. Razlog tome je taj što se procesom dehidracije žumanjka i bjelanjka jajeta toliko degradiraju pojedini sastojci te gube važna svojstva koja imaju u primjeni izrade ovih proizvoda.

## **5.2 UTJECAJ PROCESNIH PARAMETARA NA REOLOŠKA SVOJSTVA EMULZIJE ULJE/VODA**

Rezultati ispitivanja utjecaja procesnih parametara homogenizacije (brzina rotacije rotora, vrijeme homogenizacije) na reološka svojstva emulzije ulje/voda prikazani su u Tablicama 7 i 8.

U Tablici 7 vidljiv je utjecaj brzine rotora homogenizatora (10.000, 12.000, 15.000 °/min). Kod vremena 3 minute homogenizacije na reološke parametre emulzije mjerene pri 25°C.

Kontrolni uzorak emulzije izrađen je sa suncokretovim uljem kod brzine rotora 10.000 °/min pri čemu je dobivena prividna viskoznost ( $\mu$ ) 122,82 (Pa.s) i koeficijent konzistencije 16,597 (Pa.s<sup>n</sup>). Porastom brzine rotora na 12.000 °/min proizvedena je emulzija veće viskoznosti (173,99 Pa.s) i konzistencije (28,629 Pa.s<sup>n</sup>) te manja vrijednost indeksa tečenja (0,3679). Daljnjim porastom brzine rotora na 15.000 °/min dobivena je emulzija još veće prividne viskoznosti (218,44 Pa.s) i koeficijenta konzistencije (40,243 Pa.s<sup>n</sup>) te niži indeks tečenja (0,3447).

Uzorci emulzije ulje/voda izrađeni s uljem kukuruzne klice pokazuju isto ponašanje gdje je porastom brzine rotora tijekom homogenizacije došlo do formiranja emulzije veće viskoznosti i konzistencije uz sniženje vrijednosti parametara indeksa tečenja.

U Tablici 8 prikazani su rezultati vremena homogenizacije (3, 5, 7 min) kod konstantne brzine rotora 10.000 o/min na reološke parametre emulzije ulje/voda mjereno pri 25°C.

Kontrolni uzorak emulzije izrađen je kod 3 min homogenizacije.

---

Iz rezultata je vidljivo da se porastom vremena trajanja homogenizacije kod uzoraka sa suncokretovim uljem sa 3 min na 5 min povećava viskoznost emulzije (176,31 Pa.s) i koeficijent konzistencije (25,188 Pa.s<sup>n</sup>), a snižava parametar indeksa tečenja.

Izradom emulzije kod dužeg vremena homogenizacije (7 min) opet dolazi do porasta viskoznosti (229,92 Pa.s) i konzistencije (47,798 Pa.s<sup>n</sup>) uz dodatno sniženje indeksa tečenja.

Ista pojava utjecaja porasta vremena homogenizacije na porast viskoznosti i konzistencije zapažena je kod emulzije ulje/voda izrađena sa uljem kukuruzne klice.

## **6 ZAKLJUČCI**

---

Na osnovi ispitivanja utjecaja procesnih parametara homogenizacije i sastojaka na reološka svojstva emulzije ulje-voda mogu se donijeti slijedeći zaključci:

1. Emulzija ulje/voda sa 70% uljne faze pripada ne-Newtonovkim tekućinama pseudoplastičnog tipa.
2. Vrsta ugljikohidrata utječe na reološka svojstva emulzije ulje/voda izrađene sa uljnom fazom suncokretovog ulja kao i sa uljem kukuruzne klice.
3. Emulzija izrađena sa suncokretovim uljem i inulinom HD pokazuje znatno veću vrijednost prividne viskoznosti i koeficijenta konzistencije, a manju vrijednost indeksa tečenja u odnosu na druge vrste ugljikohidrata. Najniža vrijednost viskoziteta i konzistencije dobivena je primjenom glukoze.
4. Emulzija izrađena sa uljem kukuruzne klice i inulinom HD ima veću viskoznost i konzistenciju, a najniža njihova vrijednost dobivena je primjenom javorovog sirupa.
5. Emulzija sa kombinacijom suncokretovog ulja i inulina HD ima veću viskoznost i konzistenciju u odnosu na emulziju sa uljem kukuruzne klice i inulina HD.
6. Vrsta mliječne komponente utječe na reološka svojstva emulzije ulje/voda.
7. Emulzija pripremljena sa obranim mlijekom u prahu kod primjene obje vrste ulja u uljnoj fazi, pokazuje veću viskoznost i konzistenciju.
8. Najniže vrijednosti viskoznosti i konzistencije dobivene su primjenom sirutke u prahu
9. Oblik žumanjka kokošnjeg jajeta utječe na reološka svojstva emulzije ulje/voda.
10. Primjenom pasteriziranog žumanjka jajeta proizvedena je emulzija veće prividne viskoznosti i koeficijenta konzistencije, a manjeg indeksa tečenja u odnosu na primjenu svježeg žumanjka i cijelog jajeta u prahu
11. Brzina rotora homogenizatora utječe na reološka svojstva emulzije ulje/voda izrađene sa suncokretovim uljem i uljem kukuruznih klica
12. Porastom brzine rotora homogenizatora sa 10 000 na 12 000 i 15 000  $^{\circ}/\text{min}$  povećava se prividna viskoznost i konzistencija emulzija uz sniženje indeksa tečenja
13. Vrijeme trajanja homogenizacije (3,5,7 min) utječe na promjenu viskoznosti i konzistencije emulzije ulje/voda
14. Porastom vremena homogenizacije sa 3 na 5 i 7 min povećava se prividna viskoznost i konzistencija emulzija uz sniženje indeksa tečenja



- 
1. Friberg S., Larsson K., Sjoblom J.: Food Emulsions; Marcel Dekker, Inc.; 2004.
  2. Malkin Alexander Ya., Isayev I A.: Rheology Concepts, Methods, and Applications; ChemTech Publishing; 2<sup>nd</sup> edition; 2012.
  3. Barnes H.A.; Hutton J.F.; Walters K.: An introduction to rheology; Elsevier Science Publishers B.V, 3<sup>rd</sup> edition 1993.
  4. Lovrić T.: Procesi u prehrambenoj industriji s osnovama procesnog inženjerstva, Hinus, Zagreb, 2003.
  5. Munizaga G.T., Barbosa G.V.: Rheology for the food industry, Journal of Food Engineering 67, 147–156, 2005.
  6. Schramm G.: A Practical Approach to Rheology and Rheometry, Gebueder HAAKE GmbH., 2<sup>nd</sup> edition, 2000.
  7. Steffe J. P., PhD., P.E.: Rheological Methods in food process engineering; Freeman press, USA, 2<sup>nd</sup> edition, 1996
  8. Rao M. Anandha: Rheology of Fluid, Semisolid, and Solid Foods, Principles and Applications, Springer Springer Science+Business Media New York 1999, 2007, 3<sup>rd</sup> edition, 2014
  9. Genovese, D. B., Rao, M. A.: Apparent viscosity and first normal stress of starch dispersions: role of continuous and dispersed phases, and prediction with the Goddard-Miller model. Appl. Rheol. 13(4): 183–190, 2003.
  10. Hrvatska enciklopedija", Leksikografski zavod Miroslav Krleža, [www.enciklopedija.hr](http://www.enciklopedija.hr), 2016.
  11. Macosko, Christopher W.: Rheology - Principles, Measurements and Applications; John Wiley & Sons ,1994.
  12. Lelas V.: Prehrambeno - tehnološko inženjerstvo 1. Golden marketing, Tehnička knjiga, 2006.
  13. Willenbacher N. and Georgieva K.: Rheology of disperse systems; Buch\_Wiley 2013.
  14. McClements D. J.: Food emulsions, principles, practices, and techniques; CRC Press, 2016.
  15. Tadros T. F. -Emulsion Science and Technology: Wiley; VCH, 2009.
  16. Chiralt A.: Food emulsions; Food engineering: encyclopedia of life support systems; Publ 339-354, 2005



- 
17. Franck A., Interfacial Rheometry and the stability of Foams and emulsions, TA Instruments Germany, 2005)
  18. Leal-Calderon F., Schmitt V., Bibette J.: Emulsion science, basic principles; Springer Science+Business Media, LLC, 2n<sup>d</sup> edition 2007.
  19. Brooks, B.W., Richmond H.N., Zerfa M.: Phase inversion and drop formation in agitated liquid-liquid dispersions in the presence of non-ionic surfactants; Modern aspects of Emulsion Science; B.P. Binks, ed., pp.175-204, Cambridge, UK.; The Royal society of Chemistry, 1998.
  20. Kabalnov, A. S. and E. D. Shchukin: Ostwald ripening theory—Applications to fluorocarbon emulsion stability. *Advances in Colloid and Interface Science* 38: 69–97.; 1992.
  21. Kabalnov, A.; Ostwald ripening and related phenomena. *Journal of Dispersion Science and Technology*; 22 (1): 1–12; 2001.
  22. Taylor, P.: Ostwald ripening in emulsions. *Advances in Colloid and Interface Science* 75(2): 107–163.; 1998.
  23. Weiss, J, Cancelliere, C.; McClements DJ.: Mass Transport Phenomena in Oil-in-Water Emulsions Containing Surfactant Micelles: Ostwald Ripening. *Langmuir*. 16: 6833-6838, 2000.
  24. Kabalnov A.: Coalescence in emulsions; Modern aspects of Emulsion Science; B.P. Binks, ed., pp.205-260, Cambridge, UK.; The Royal society of Chemistry, 1998.
  25. Walstra P; *Physical Chemistry of food*; New York; Marcel Decker; 2003.
  26. Sikra S.: Utjecaj vrste ulja, ugljikohidrata i žumanjaka na reološka svojstva majoneze, Prehrambeno tehnološki fakultet Osijek, 2011.
  27. Mikec D.: Utjecaj sastojka i homogenizacije na reološka svojstva salatne majoneze s dodatkom kaše bundeve, Prehrambeno tehnološki fakultet Osijek, 2014.